

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.006

Airy 光束聚焦后自恢复与透镜校正研究

高晓梅¹ 张永红²

(1. 西安航空职业技术学院计算机工程学院 西安 710089;

2. 西安航空职业技术学院航空维修工程学院 西安 710089)

摘要: Airy 光束是一种特殊的无衍射光束,具有自恢复性及自弯曲性。根据衍射理论对聚焦后有限能量 Airy 光束的自恢复现象进行了研究,利用三角棱镜和圆形聚焦透镜组成的光学系统产生了 Airy 光束,所得到的 Airy 光束衰减较快。通过增加透镜对光束进行修正,并对修正前后 Airy 光束的光强分布的变化进行数值模拟和对比。结果表明,在一定传输距离内,有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束随着传播距离的增大很快衰减。通过加入校正透镜可以抑制 Airy 光束的衰减。

关键词: 激光传输;有限能量 Airy 光束;自恢复;光强分布

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015;510.20

Study on self-healing property of airy beam and the method of lens correction

Gao Xiaomei¹ Zhang Yonghong²

(1. School of Computer Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China;

2. School of Aviation Maintenance Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Airy beam is a special non-diffraction beam with self-recovery and self-bending. We studied the self-recovery of the finite energy airy beam after focusing based on the diffraction theory. The airy beam generated by the optical system composed of triangular prism and circular focusing lens decays faster. We both found the beam can be corrected through adding the lens, and research on numeric simulation and comparison of the change of the light intensity distribution of the airy beam before and after the correction. The results show that the self-restoring beam of the finite energy airy beam is attenuated rapidly with the propagation distance in a certain transmission distance. Therefore we concluded that the addition of the correction lens can suppress the attenuation of the airy beam.

Keywords: laser beam transmission; infinite energy airy beam; self-healing; light intensity distribution

1 引言

无线激光^[1-2]通信越来越受到人们的关注。西安理工大学柯熙政教授团队^[3-7]自2000年起,在无线光通信系统^[8]、紫外光通信系统^[9]、无线光通信编码^[10-11]及部分相干光束在湍流大气中传输^[12]等方面进行了广泛的理论及实验研究。在此基础上,本文对 Airy 光束聚焦后自恢复与透镜校正研究。Airy 光束具有无衍射性、自恢复性以及自弯曲性。Airy 光束在微小颗粒控制、大气传输、清理光学颗粒以及光子弹等方面都有很大的应用前景。

1979年,美国科学家 Berry 和 Balazs 从近轴波动方程和薛定谔方程中推导出 Airy 波包的解,并定义此波包具有自由加速的性质。1987年, Durnin 等人发现无衍射光束可远距离传输,不会因为衍射而发生畸变,并详细描述了无衍射光的基本概念及其相关理论。随着人们对无衍射光束的深入研究,一些新型无衍射光束被人们所发现,如 Mathieu 光束^[13]、Airy 光束等^[14]。2007年 Siviloglou 和 Christodoulides 等人首次提出有限能量 Airy 光束,实验研究加速过程中的有限能量 Airy 光束,发现 Airy 光束具有长距离无衍射传播特性^[14]。Siviloglou 等人^[15]研究发现 Airy 光束的自恢复性质是通过自身的能量流动完成的。

Airy 光束具有自恢复性。自恢复性是指当 Airy 光束在传播过程中遇到障碍物遮挡,丢失部分信息后会通过自身的能量流动完成 Airy 光束的自恢复现象,即有抗扰动能力^[16]。Airy 函数在数学上是不可积的,说明 Airy 光束所携带的能量是无限大的^[16]。在高斯光束上进行相位调制,再通过透镜变换,就能够得到有限能量 Airy 光束^[16]。

本文根据衍射理论分析有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复现象,推导出有限能量 Airy 自恢复光束的光场分布表达式和光强表达式并进行数值模拟与分析。本文采用焦距为 f' 的另一个正透镜对自恢复 Airy 光进行校正,最终表明校正后的光束随着传播距离的增加几乎不变。分析有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复现象以及对自恢复光束的校正,为 Airy 光束的将来的普及提供了很好的研究思路。

2 理论分析

有限能量 Airy 光束的表达式为^[17]:

$$f(x, y, z = 0) = \phi_0 Ai(ax) Ai(y) \exp(ay) \quad (1)$$

式中: a 是截断系数, ϕ_0 是初始振幅, $Ai(\cdot)$ 是 Airy 函数。

理论和实验表明 Airy 光束的自恢复性是靠其内部的能量流动实现的^[17]。在高斯光束上叠加立方空间相位调制,再通过透镜变换,就能够得到有限能量 Airy 光束。Airy 光束的自恢复性是靠其内部的能量流动实现的,在干扰情况下, Airy 光束可以保持原来的形状,而在相同情况下高斯光束就会产生不可忽视的变形^[17]。

研究发现,扰动条件下 Airy 光束可以保持原来的形状,而在相同情况下高斯光束就会发生巨大的变形^[15]。有限能量 Airy 光束的自聚焦后自恢复的原理如图 1 所示。

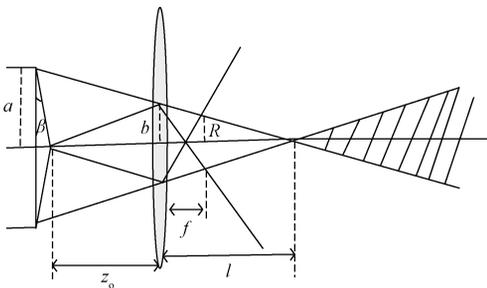


图 1 有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复的几何原理^[18]

Fig. 1 Geometry principle of the recovery focused finite energy airy beam

图 1 左边的三角形为轴棱锥镜,中间的长椭圆形为

聚焦透镜,轴棱锥透镜系统生成有限能量 Airy 光束最大准直距离为 $k_r = k \sin \theta$ 。在有限能量 Airy 光束可允许的最大距离内放入一个合适的聚焦透镜不但可以得到有限能量 Airy 光束,还可以得到有限能量 Airy 光束的自恢复光束。图 1 中的阴影区域是近似有限能量 Airy 光束相互叠加产生的。轴棱锥的折射率为 n ,入射到轴棱锥镜上的光束半径为 a ,轴棱锥的底角为 β 。聚焦透镜的焦距为 f ,入射到聚焦透镜上的光束半径为 $b = z_0(n - 1)\beta$,聚焦透镜到轴棱锥的距离为 z_0 。有限能量 Airy 光束在焦平面上聚焦后阴暗区域最大的半径是 $R = f(n - 1)\beta$ 。通过几何学的联系可以得到 $l = f/(1 - R/b)$ 是有限能量 Airy 光束聚焦后开始自恢复点距聚焦透镜的距离,此距离之外是光束相干叠加产生的有限能量 Airy 光束的自恢复区域。

Airy 光束的光场分布^[18]为:

$$E_1 = c \frac{Ai(k_r r_1)}{k_r r_1} \quad (3)$$

式中: c 是常数因子, $Ai(\cdot)$ 是 Airy 函数, k_r 为径向波矢分量, r_1 是径向坐标。

矩阵光学就是利用代数运算研究光学问题,随着人类对激光认识的不断深入,光束通过光学系统用一个转换矩阵来描述,也就是运用 ABCD 传输矩阵^[19]。根据惠更斯衍射积分公式以及 Airy 光束的光场分布表达式,通过 ABCD 矩阵研究有限能量 Airy 光束。ABCD 矩阵是光通过光学系统的变化矩阵元,表示为^[19]:

$$\begin{Bmatrix} A & B \\ C & D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & f+z \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -z/f & f \\ -1/f & 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

对于大量光衍射现象的处理,需要比较精确的数学表述,应用在柱坐标下的广义惠更斯—菲涅耳衍射积分公式^[19]。

$$E(r, z) = -\frac{i}{\lambda f} \exp(ikz) \int_0^b E_1(r_1) 2\pi j_0 \left[\frac{kr_1 r}{f} \right] \exp\left[\frac{ik}{2B} [A(r_1)^2 + D(r_2)^2] \right] r_1 dr_1 \quad (5)$$

惠更斯—菲涅耳原理可表述为波前上每一点都可以看成是一个新的波源,从这些点发出次波,空间中某一点的光波场就是这些次波在该点的相干迭加。 r 是横向坐标, z 是光的传输距离,有限能量 Airy 光束入射到聚焦透镜上的光束半径为 b ,波数是 $k = 2\pi/\lambda$,将式(3)、(4)代入式(5)中,可以得到:

$$E(r, z) = -\frac{ki}{f} \exp(ikz) \int_0^b \frac{j_1(k_r r_1)}{k_r r_1} j_0 \left[\frac{kr_1 r}{f} \right] \exp\left(-\frac{zik}{f^2} r_1^2 \right) r_1 dr_1 \quad (6)$$

$$I(r, z) = E(r, z)E(r, z)^* \quad (7)$$

实部相等虚部互为相反数的复数互为共轭复数,所以 $E(r, z)$ 和 $E(r, z)^*$ 是共轭复数。依据式(6)和(7)可以得到有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的光强分为:

$$I(r, z) = \left[\frac{kc}{f} \right]^2 \left[\int_0^b \frac{jAi(k_r r_1)}{k_r r_1} j_0 \left[\frac{k r_1 r}{f} \right] \cdot \exp\left(-\frac{zik}{f^2} r_1 dr_1\right) \right]^2 \quad (8)$$

利用式(8)对有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束的光强分布进行数值模拟,结果如图 2、3 所示。

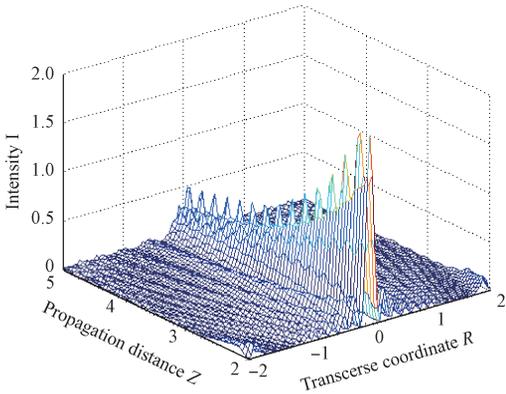
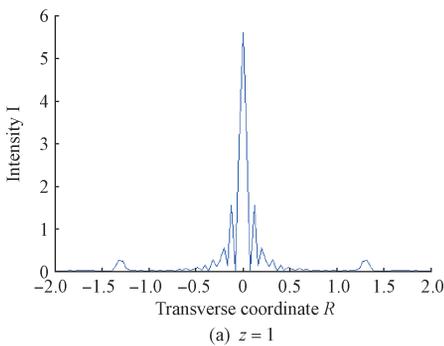
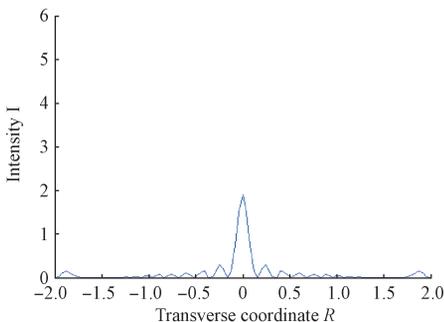


图 2 有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的三维光强分布

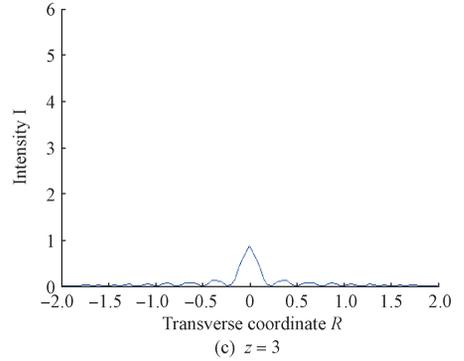
Fig. 2 The 3D light intensity distribution of the recovery focused finite energy airy beam



(a) $z = 1$



(b) $z = 2$



(c) $z = 3$

图 3 聚焦自恢复后的 Airy 光在传播方向上的截面图

Fig. 3 The cross section view along the propagation direction of the recovery focused airy beam

3 Airy 光束自恢复后的仿真结果与分析

利用式(8)对自恢复光束光强分布进行数值模拟,结果如图 2、3 所示。仿真选取的参数为:波数 $k = 2\pi/\lambda$, 波长 $\lambda = 850 \text{ nm}$, 径向波矢分量 $k_r = k\sin\theta$, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $\theta = \pi/16$, 入射到聚焦透镜上的光束半径 $b = z_0(n-1)\beta$, n 为轴棱锥的折射率, $n = 1.516$ 轴棱锥的底角 $\beta = 0.5\pi/180$, 聚焦透镜到轴棱锥的距离 $z_0 = 750 \text{ mm}$, j_0 是零阶贝塞尔函数, $Ai(\cdot)$ 为 Airy 函数, r_1 是径向坐标, r 为横向坐标, z 为传播距离。为了作图方便,对聚焦透镜的焦距 f 以及传输距离 z 进行归一化处理 ($f=3$)。图 2 所示为有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的三维光强分布。图 3 所示为有限能量 Airy 光束聚焦自恢复后,光束 z 轴向前传播,取不同距离处的截面图,图 3(a) ~ (c) 分别表示自恢复光束在 $z = 1$ 、 $z = 2$ 、 $z = 3$ 处的光强截面图。

由图 2 可以看出,有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的光强大小随着传输距离的增大迅速衰减,中心光斑也在不断扩散。由此可见,有限能量 Airy 自恢复光束的光强在传播过程中很快衰减。这一现象从有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的不同传输距离的光强截面图 3 可以更清晰的看到。

由图 3 可以看出,图 3(a) ~ (c) 分别是 Airy 自恢复光束在 $z = 1$ 、 $z = 2$ 、 $z = 3$ 处的光强截面图。 R 轴上 $R = 0$ 处为自恢复光束的主瓣光强大小,随着传播距离的增大,自恢复光束的主瓣光强衰减较快,同时光束也在不断发散。此结果的物理意义是因为有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束在传输时,受到衍射和折射率的影响,波束出现相位畸变,从而自恢复 Airy 光束随着传输距离的增加而不断衰减。此结果的物理意义是因为有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束在大气湍流中传输

时,受到自由空间衍射和大气折射率的影响,波束出现相位畸变,从而自恢复 Airy 光束随着传输距离的增加而不断衰减。比较图 3(a)与(c)可以观察到 Airy 自恢复光束的强度在传播过程中很快衰减。这个现象严重限制了自恢复光束的应用。因此,研究如何校正自恢复光束是十分必要的。

4 自恢复光束的校正

Airy 光束在扰动条件下 Airy 光束可以保持原来的形状^[5],但经过自恢复后的 Airy 光束随着传播距离的增加迅速衰减。为了避免这种情况,假设将另一个透镜放在聚焦透镜之后,使聚焦透镜与新增透镜构成了望远系统。为了恢复自恢复光束的原有光强大小,新增透镜应选一个焦距为 f 的透镜,且 $f = f'$, $z = f + f'$,则校正后的 Airy 光束矩阵变为:

$$\begin{Bmatrix} A & B \\ C & D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 2f' + f \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & f' \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1 - \frac{f}{f'} & f' \\ -\frac{1}{f'} & 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

若 $f = f'$, 则:

$$\begin{Bmatrix} A & B \\ C & D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -2 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

将式(3)、(10)代入式(5)中得矫正后自恢复 Airy 光束的光场分布及光强表达式:

$$E(r, z) = -\frac{ki}{f} \exp(ikz) \int_0^b c \frac{j_1(k_r z r_1)}{k_r r_1} j_0\left[\frac{kr_1 r}{f}\right] \cdot \exp\left(-\frac{ik}{f} r_1^2\right) r_1 dr_1 \quad (11)$$

因为 $I(r, z) = E(r, z)E(r, z)^*$, $E(r, z)$ 和 $E(r, z)^*$ 是共轭复数。实部相等虚部互为相反数的复数互为共轭复数。依据式(10)可以得到有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的光强分布为:

$$I(r, z) = \left[\frac{kc}{f}\right]^2 \left[\int_0^b \frac{j_1(k_r z r_1)}{k_r r_1} j_0\left[\frac{kr_1 r}{f}\right] \cdot \exp\left(-\frac{ik}{f} r_1^2\right) r_1 dr_1 \right]^2 \quad (12)$$

5 自恢复光束校正后的仿真结果与分析

利用式(11)对校正后 Airy 自恢复光束光强分布进行数值模拟,取 $f = 3$, $f' = 3$, 结果如图 4、5 所示。仿真选取的参数为:波数 $k = 2\pi/\lambda$, 波长 $\lambda = 850 \text{ nm}$, 径向

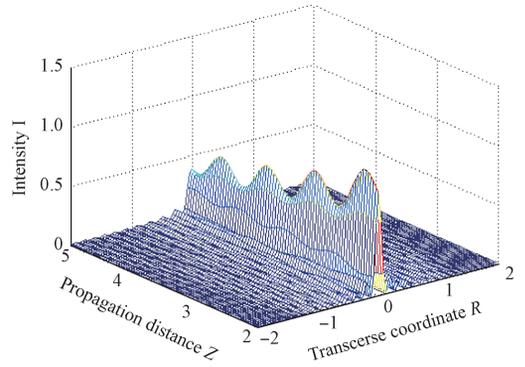
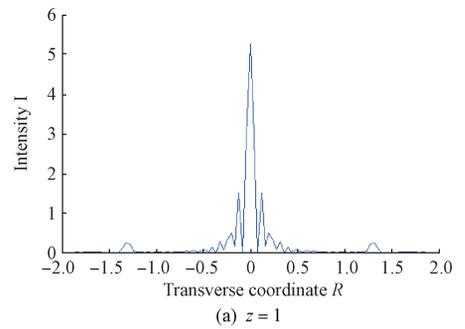
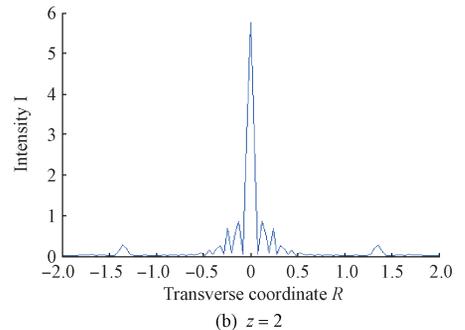


图 4 校正后有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的三维光强分布

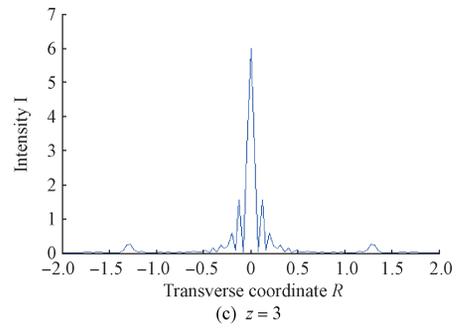
Fig. 4 The 3D light intensity distribution of the calibrated recovery focused finite energy Airy beam



(a) $z = 1$



(b) $z = 2$



(c) $z = 3$

图 5 校正过后的聚焦自恢复 Airy 光在传播方向上的截面图

Fig. 5 The cross section view along the propagation direction of the calibrated recovery focused airy beam

波矢分量 $k_r = k \sin \theta$, 光速 $c = 3 \times 10^3 \text{ m/s}$, $\theta = \pi/16$, 入射到聚焦透镜上的光束半径 $b = z_0(n-1)\beta$, $n = 1.516$ 为轴棱锥的折射率, 轴棱锥的底 $\beta = 0.5\pi/180$, 聚焦透镜到轴棱锥的距离 $z_0 = 750 \text{ mm}$, j_0 是零阶贝塞尔函数, $Ai(\cdot)$ 为 Airy 函数, r_1 是径向坐标, r 为横向坐标, z 为传播距离。为了作图方便, 对聚焦透镜的焦距 f 以及传输距离 z 进行归一化处理 ($f = 3$)。

为了作图方便, 对聚焦透镜的焦距 f 以及传输距离 z 进行归一化处理 ($f = 3$)。由图 4 可以看出, 校正后的 Airy 自恢复光束的光强随着传输距离 z 的增加几乎不再发生衰减。对比图 2 和图 4 可知, 校正后的有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束随着传播距离的增加只是呈波浪式上下波动, 衰减程度明显比校正前光束低很多。由仿真结果可以看出, 该方法有效降低了有限能量 Airy 自恢复光束的衰减程度。这一现象从有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束的不同传输距离的光强截面图 5 可以更清晰的看到。

图 5 所示为校正后的有限能量 Airy 光束聚焦后自恢复光束在不同传输距离下的光强变化。由图 5 可以看出, 图 5(a) ~ (c) 分别是 Airy 自恢复光束校正后在 $z = 1$ 、 $z = 2$ 、 $z = 3$ 处的光强截面图。R 轴上 $R = 0$ 处为校正后自恢复光束的主瓣光强大小, 随着传播距离的增大, 校正后 Airy 自恢复光束的主瓣光强几乎不再衰减, 也几乎不再发散。比较图 5(a) 与 (c) 可以观察到 Airy 自恢复光束的强度在传播过程中几乎不再衰减。此结果的物理意义是因为有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束在大气湍流中传输时, 受到自由空间衍射和大气折射率的影响, 光束出现相位畸变, 从而自恢复 Airy 光束随着传输距离的增加而不断衰减。对比图 5 和 3 可知, 校正后的有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复光束在实际应用中利用价值更大。

6 结 论

本文根据光束的衍射理论分析了有限能量 Airy 光束经过聚焦透镜后的自恢复现象, 并推导出有限能量 Airy 自恢复光束的光场分布表达式和光强表达式, 主要对有限能量 Airy 光束经过聚焦透镜后的自恢复现象以及运用透镜校正的方法进行研究, 数值模拟了光强的总体分布和在传播方向上不同截面的光强强度, 并具体分析了自恢复光束的光强在传播行进中的变化情况。结果表明, 有限能量 Airy 光束聚焦自恢复后, 在光的传播方向上光强迅速衰减, 光束也迅速发散。当加入一个校正透镜后, 光束随传播距离的增加不再发生变化。研究有限能量 Airy 光束聚焦后的自恢复现象以及对自恢复光束的校正, 为 Airy 光束的运用提供理论支撑。

参考文献

- [1] 施龙, 张文豹, 于萍, 等. 水平式激光发射系统激光指向远场检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1183-1189.
SHI L, ZHANG W B, YU P, et al. Study on the remote testing method of the laser pointing error for the level mounting laser transmitter system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8):1183-1189.
- [2] 陈小宇, 刘佐牙. 激光回波小信号宽带放大器设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10):109-112.
CHEN X Y, LIU Z Y. Design of wideband amplifier of weak laser echo signal [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(10):109-112.
- [3] KE X ZH, CHEN J, LV H. Effect of atmospheric turbulence on the orbital angular momentum of hollow vortex beams[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(12):1-9.
- [4] LI J X, KE X ZH. Study on autonomous navigation based on pulsar timing model [J]. Science in China: Physics Astronomy, 2009, 52(2):303-309.
- [5] WANG H Q, KE X ZH, ZHAO L. MIMO free space optical communication based on orthogonal space time block code[J]. Science in China: Information Sciences, 2009, 52(8):1483-1490.
- [6] KE X ZH, LEI S CH. Spatial light coupled into a single-mode fiber by a Maksutov-Cassegrain antenna through atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2016, 55(15):3897-3902.
- [7] 柯熙政, 王姣. 大气湍流中部分相干光束上行和下行传输偏振特性的比较[J]. 物理学报, 2015, 64(22):144-151.
KE X ZH, WANG J. Comparison of polarization property of partially coherent beam between propagating along an uplink path and a downlink path in atmospheric turbulence [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22):144-151.
- [8] 刘彦飞, 代永红, 单欣, 等. 高帧频 CMOS 相机对光通信跟踪系统影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1319-1325.
LIU Y F, DAI Y H, SHAN X, et al. Analysis of the impact of high frame frequency CMOS camera on optical communication fine tracking system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6):1319-1325.
- [9] 汪龙祺, 匡海鹏, 曹小涛. 紫外-真空紫外光谱反射率测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9):17-21.
WANG L Q, KUANG H P, CAO X T. Ultraviolet and

- vacuum ultraviolet spectral reflectance measurement system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(9):17-21.
- [10] 柯熙政,陈娟,邓莉君. 无线光 MIMO 系统中空时编码理论[M]. 北京:科学出版社,2014.
KE X ZH, CHEN J, DENG L J. Wireless Optical MIMO System Space Time Coding Theory[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [11] 柯熙政,殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京:科学出版社,2009.
KE X ZH, YIN ZH Y. Coding Theory in Wireless Laser Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 柯熙政,邓莉君. 无线光通信中的部分相干光传输理论[M]. 北京:科学出版社,2016.
KE X ZH, DENG L J. Theory of Partially Coherent Optical Transmission in Wireless Optical Communication [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [13] 李冬,吴逢铁,谢晓霞,等. 无衍射 Mathieu 光束自重建特性的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(1): 14201-1-014201-6.
LI D, WU F T, XIE X X et al. Theoretical and experimental studies on the self-reconstruction property of non-diffracting Mathieu beam[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(1):14201-1-14201-6.
- [14] 乐阳阳,肖寒,王子潇,等. 关于 Airy 光束衍射及自加速性质的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 44205-1-44205-4.
YUE Y Y, XIAO H, WANG Z X et al. Research on diffraction and self-acceleration of Airy beam[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4):44205-1-44205-4.
- [15] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, et al. Observation of accelerating airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901-213904.
- [16] BROKY J, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, et al. Self-healing properties of optical airy beams[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [17] 于文龙,章礼富,谭超,等. 有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦特性[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 519001-1-519001-7.
YU W L, ZHANG L F, TAN CH, et al. Small-scale self-focusing of finite energy airy beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 519001-1-519001-07.
- [18] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-981.
- [19] 吴逢铁,江新光,刘彬,等. 轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3125-3129.
WU F T, JIANG X G, LIU B. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3125-3129.

作者简介



高晓梅, 1999 年于西安工程大学获得学士学位, 2006 年于西安理工大学获得硕士学位, 2015 年至 2016 年于西北大学进行青年骨干教师国内访问学者学术交流, 现为西安航空职业技术学院副教授, 主要研究方向为无线激光通信。

E-mail: gaomiaomei@126.com

GAO Xiaomei received her B. Sc. degree in 1999 from Xi'an Polytechnic University, received her M. Sc. degree in 2006 from Xi'an University of Technology, was as young backbone teachers visiting scholar between 2015 and 2016 in Northwest University, now she is associate professor in Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute. Her main research interest include wireless laser communication.